

30X

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
им. Ленинского комсомола

На правах рукописи

ГЛАДЫШЕВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С РЕЛЕЙНО-ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.13.14 –
"Автоматическое управление и регулирование"

Автореферат диссертации на
искание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

Челябинск, 1973

Работа выполнена на кафедре автоматики и телемеханики
Челябинского политехнического института им. Ленинского ком-
сомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Пинчук И.С.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Черноруцкий Г.С.,
кандидат технических наук, доцент Новиков М.Н.

Ведущее предприятие - Челябинский металлургический завод.

Автореферат разослан "___" 1973 г.

Защита состоится "___" 1973 г.

в 15 часов, в аудитории 244 (конференцзал) на заседании Совета
по присуждению ученых степеней при энергетическом и приборо-
строительном факультетах Челябинского политехнического инсти-
тута им. Ленинского комсомола.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных пе-
чатью учреждения, просим направить по адресу: 454044,
Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Совет ЧПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета
канд. техн. наук, доцент



КОРОЛЕНКО Д.А.

В В Е Д Е Н И Е

Директивы XXIУ съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 г. предусматривают повышение производительности труда в промышленности на 36-40%. При этом значительная роль в повышении производительности труда отводится дальнейшей автоматизации производства.

Мощные управляемые выпрямители, создаваемые на базе тиристоров (обладающих высокими технико-экономическими показателями) находят широкое применение в самых различных областях народного хозяйства. Являясь устройствами для преобразования электрической энергии переменного тока в постоянный, они во многих случаях выступают в качестве исполнительного органа замкнутой системы автоматического регулирования того или иного производственного процесса или рабочего механизма.

Несмотря на то, что в настоящее время освоено серийное производство управляемых выпрямителей (преобразователей), как отмечалось на VII Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу, задача дальнейшего детального и более глубокого теоретического изучения их свойств остается актуальной. Наименее изученными в настоящее время следует считать динамические свойства замкнутых схем с управляемыми выпрямителями, хотя существенный вклад в этом направлении внесен работами Булгакова А.А., Шипилло В.П. и др.

При прочих условиях, свойства управляемого выпрямителя, как динамического звена, в значительной степени зависят от принятого принципа управления выпрямителем. Широкое применение управляемых выпрямителей привело к созданию большого количества схем управления отличающихся, как принципом построения так и конструктивным исполнением. Наибольшее распространение на практике получили многоканальные схемы с вертикальным управлением, которые обладают достаточно высоким быстродействием, но имеют и недостатки, в числе которых - асимметрия выходных импульсов при постоянном значении сигнала управления, обусловленная естественным разбросом параметров элементов различных каналов. Этот недостаток устраняется в схемах выполненных по одноканальному принципу.

Схемы с релейно-фазовым управлением разрабатываемые на кафедре АиГ ЧЛИ относятся к одноканальным, работа фазосмещающих устройств которых в рабочем диапазоне угла регулирования осуществляется без синхронизации от сети переменного тока. Помимо высокой симметрии открывающих импульсов, в схемах с релейно-фазовым управлением может быть получена максимальная статическая точность, т.к. по своим свойствам они близки к статическим системам непрерывного действия, кроме того они в меньшей степени подвержены влиянию друг на друга через сеть переменного тока, по сравнению со схемами вертикального управления, цели синхронизации фазосмещающих устройств которых связаны с сетьевым напряжением.

По конструктивному исполнению схемы с релейно-фазовым управлением отличаются существенной простотой.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию динамических свойств управляемых выпрямителей с релейно-фазовым управлением. Для сравнения в работе параллельно ведется исследование динамических свойств выпрямителей с вертикальным управлением.

Работа состоит из пяти глав.

В первой главе производится обзор и классификация одноканальных схем. Во второй и третьей исследуется устойчивость замкнутых схем с управляемым выпрямителем соответственно при идеальных условиях и различных токовых режимах. В четвертой главе исследуется быстродействие замкнутых схем с управляемым выпрямителем. Пятая глава посвящена вопросам конструирования схем с релейно-фазовым управлением.

Результаты работы использованы при проектировании и наладке тиристорных преобразователей для электропривода станинных роликов и электропривода рабочих рольгангов перед универсальной клетью стана 2300 ЧМЗ.

ГЛАВА 1

ОБЗОР ОДНОКАНАЛЬНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ

По способу синхронизации фазосмещающего устройства одно-

нальные схемы разделяются на две группы:

- 1) с синхронизацией,
- 2) без синхронизации от сети переменного тока.

Достоинством первых следует считать высокую симметрию отывающих импульсов при постоянном значении сигнала управления по сравнению с многоканальными, в одном из недостатков - влияние искажения сетьевого напряжения (например, при работе соседнего выпрямителя) на свойства схемы управления за счет связи, цепи синхронизации фазосмещающего устройства, с сетьевым напряжением.

Этот недостаток устраняется в схемах управления второй группы, ввиду отсутствия указанной связи.

Схемы управления второй группы могут работать только при замкнутом состоянии цепи обратной связи и по своим свойствам они сходны с астатическими системами непрерывного действия, поэтому в них достигается наибольшая статическая точность.

Как правило, известные одноканальные схемы второй группы включают в себя: нуль орган, на входе которого сравнивается сигнал пилообразной формы с мгновенным или усредненным за период значением сигнала управления ($U_{ac} - U_3$), и формирователь распределитель импульсов. В момент равенства сравниемых сигналов нуль орган срабатывает и подает команду на формирование открывающего импульса на очередной вентиль, а также на запуск генератора пилообразного напряжения.

В зависимости от вида сравниваемого сигнала с пилообразным, получается соответственно два способа регулирования выходной величиной: по мгновенной и усредненной за период величине сигнала управления.

Схемы с релейно-фазовым управлением относятся ко второй группе, а поэтому обладают положительными свойствами этой группы, в них сравнительно просто реализуется регулирование, как по мгновенной так и усредненной за период величине сигнала управления.

Релейно-фазовое управление является результатом дальнейшего усовершенствования релейного - разработанного на кафедре ЭПР МБИ. В схемах с релейным управлением, на входе нуль органа (релейного элемента) пилообразное напряжение отсутствует

вует, а релейный элемент включается и отключается за счет пульсации в напряжении управления, с частотой определяемой частотой пульсации выпрямленного напряжения.

Основным достоинством схем с релейным управлением является их существенная простота, но они имеют недостаток, ограниченный диапазон регулирования, который устраняется в схемах с релейно-фазовым управлением с сохранением достоинства релейных.

В заключении первой главы устанавливается качественная связь между различными способами управления.

Если предположить, что линейная часть замкнутой схемы с вертикальным управлением (выполненной по многоканальному принципу), а также одноканальных схем второй группы, первого порядка, коэффициент передачи линейной части равен единице (при этом коэффициент усиления в соответствующих схемах управления может изменяться за счет изменения угла наклона пилообразного сигнала), то оказывается: при уменьшении угла наклона пилообразного напряжения до нуля (что равносильно при принятых допущениях увеличению коэффициента усиления разомкнутой системы до бесконечности) перечисленные способы управления сводятся к релейному.

Установленная связь позволяет в дальнейшем вести сравнение динамических свойств схем с различными способами управления.

ГЛАВА II

УСТОЙЧИВОСТЬ ФАЗОВОГО РЕЖИМА ЗАМКНУТЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ИДЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Теоретическое и практическое исследование динамических свойств схем с релейным управлением и линейной частью первого порядка, выполненные авторами на кафедре ЭПР МЭИ показали, что устойчивые режимы фазового регулирования (пределной частоты автоколебаний релейного элемента равный частоте пульсации выпрямленного напряжения) возможны не во всем диапазоне регулирования.

Вместе с тем практика наладки схем с вертикальным и ре-

линейно-фазовым управлением (линейная часть которых первого порядка) показывает, что замкнутые схемы при определенной величине коэффициента усиления могут быть устойчивы практически во всем диапазоне регулирования. Отсюда возникает задача определить: Каким образом выбирать коэффициент усиления замкнутой системы с тем, чтобы она была устойчива во всем диапазоне регулирования и обладала наилучшими динамическими показателями, например, по быстродействию?

Особенностью решения поставленной задачи является то, что при анализе необходимо использовать сравнительно точный метод, учитывающий форму пульсации напряжения обратной связи.

Выполненный в работе обзор аналитических методов, применяемых для исследования замкнутых схем с управляемым выпрямителем (которые являются нелинейными импульсными системами автоматического регулирования) показывает, что они являются в основном приближенными и могут быть разделены на два направления.

Методы первого направления основаны на замене управляемого выпрямителя некоторой эквивалентной непрерывной схемой замещения. Возможность использования хорошо разработанного математического аппарата для исследования непрерывных систем, является существенным достоинством методов первого направления. Недостатком - довольно приближенный характер представления управляемого выпрямителя.

Методы другого направления основаны на представлении замкнутой схемы с управляемым выпрямителем некоторой эквивалентной импульсной системой, которые отличаются большей точностью по сравнению с методами первого направления.

Для исследования условий возникновения автоколебаний в замкнутой схеме с управляемым выпрямителем используется метод гармонического баланса. При этом результаты исследования, опубликованные в литературе, относятся только к углу регулирования $\delta = 90$ эл. градусов и не позволяют судить об условиях возникновения автоколебаний при других углах.

Из методов второго направления наиболее точным представляется метод исследования устойчивости установившегося режима в замкнутой схеме с линейной частью первого порядка основанный на исследовании отношения $\frac{dd_{n+1}}{dd_n}$ (где dd - линейная часть

приращения угла регулирования от установленного режима). Если это отношение меньше единицы, то система устойчива и наоборот.

Фактически указанное отношение представляет собой корень характеристического уравнения однородного линеаризованного разностного уравнения первого порядка, описывающего замкнутую систему. Поэтому в работе ставится вопрос о возможности исследования замкнутых схем в общем случае с линейной частью произвольного порядка методом линеаризованных разностных уравнений.

Для ответа на этот вопрос сначала методом точечных преобразований исследуется характер нелинейности вносимой выпрямителем для случая замкнутой системы с вертикальным управлением описываемой нелинейным разностным уравнением первого порядка.

Приведенные в работе кривые $\Delta_{n+1} = f(\Delta_n)$ показывают, что нелинейность вносимая выпрямителем не является существенной (типа релейной и т. д.), она непрерывна и допускает линеаризацию.

Окончательный положительный ответ на поставленный вопрос получен в общем виде аналитически, путем доказательства, что нелинейная система разностных уравнений описывающих замкнутую систему с управляемым выпрямителем и линейной частью $X^{(0)}$ порядка удовлетворяет условиям теоремы А.М. Ляпунова об исследовании нелинейных систем по первому приближению доказанную для случая импульсных систем П.В. Бромбергом.

Это условие сводится к тому, что система нелинейных разностных уравнений первого порядка описывающих нелинейную импульсную систему

$$X^{(n+1)} = f[X^{(n)}], \quad (1)$$

где

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_K \end{bmatrix}$$

вектор переменных состояния (координат фазового пространства) характеризующих состояние системы управления в дискретные моменты времени,

$$f[X(n)] = \begin{bmatrix} f_1[X(n)] \\ f_2[X(n)] \\ \vdots \\ f_n[X(n)] \end{bmatrix}$$

вектор нелинейных функций

может быть представлена в виде

$$\Delta X_{(n+1)} = A \Delta X_{(n)} + \tilde{X}_{(n)}, \quad (2)$$

где A - матрица постоянных коэффициентов линейного приближения

$$\tilde{X}_{(n)} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_1(n) \\ \tilde{X}_2(n) \\ \vdots \\ \tilde{X}_k(n) \end{bmatrix}$$

являются функциями переменных $\Delta x_1(n), \dots, \Delta x_k(n)$,

представляемые в виде абсолютно сходящихся степенных рядов, которые начинаются с членов не ниже второго порядка относительно этих переменных.

Исследование устойчивости конкретных схем управления с помощью линеаризованных разностных уравнений сводится к выполнению следующей последовательности операций:

1. Составляется система нелинейных разностных уравнений первого порядка, описывающая замкнутую систему.

2. Отыскивается линейное приближение нелинейной системы разностных уравнений в виде

$$\Delta X_{(n+1)} = A \Delta X_{(n)}, \quad (3)$$

где ΔX - вектор отклонения переменных состояния,

$$A = \begin{bmatrix} [x_1'(n+1)_{x_1(n)}]_o & [x_1'(n+1)_{x_2(n)}]_o & \dots & [x_1'(n+1)_{x_k(n)}]_o \\ [x_2'(n+1)_{x_1(n)}]_o & [x_2'(n+1)_{x_2(n)}]_o & \dots & [x_2'(n+1)_{x_k(n)}]_o \\ [x_k'(n+1)_{x_1(n)}]_o & [x_k'(n+1)_{x_2(n)}]_o & \dots & [x_k'(n+1)_{x_k(n)}]_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

- матрица постоянных коэффициентов, представляющая собой частные производные первого порядка, в точках с установленными значениями переменных состояния.

3. Вычисление собственных значений матрицы А путем решения характеристического уравнения

$$|A - \lambda E| = 0, \quad (5)$$

где E - единичная матрица,

λ - вектор корней характеристического уравнения.

4. Определение на основе неравенства

$$|\lambda| < 1$$

областей устойчивости в зависимости от конкретных параметров схемы управления.

Из всей последовательности операции в общем виде (в работе) рассматривается порядок составления системы нелинейных разностных уравнений описывающих замкнутую схему с управляемым выпрямителем и линейной частью $\chi^{(2)}$ порядка в случае вертикального и релейно-фазового управления.

При анализе областей устойчивости конкретных схем предполагается, что выходное сопротивление сети пренебрежимо мало, коммутация вентилей идеальная, ток силовой цепи непрерывен, все каналы в схеме с вертикальным управлением симметричны.

Основные результаты полученные при исследовании областей устойчивости конкретных схем с линейной частью первого и втор-

рого порядка и различными способами управления можно сформировать следующим образом:

1. Замкнутые схемы с управляемым выпрямителем и линейной частью первого порядка могут иметь неустойчивые режимы регулирования (при уменьшении угла наклона пилообразного напряжения до нуля) в области инверторных углов регулирования при естественной и области выпрямительных углов регулирования при искусственной коммутации вентилей.

2. Границы областей устойчивости в схемах с вертикальным управлением и релейно-фазовым (когда регулирование ведется по усредненной за период величине сигнала управления), при положительном значении угла наклона пилообразного напряжения, отличаются несущественно, что указывает на сходство их динамических свойств.

3. Схемы с релейно-фазовым управлением и регулированием по мгновенному значению сигнала управления имеют особенности:

1) В случае линейной части первого порядка граничная кривая претерпевает излом в области инверторных режимов, после которого граничная кривая резко нарастает.

2) В случае линейной части второго порядка и постоянной времени T_y превышающей величину $T_y \approx \frac{2}{3}$ (где T_y - период пульсации выходного напряжения выпрямителя) наблюдается также резкий подъем граничной кривой.

4. Получено точное совпадение областей устойчивости в схемах с разными способами управления, при уменьшении угла наклона пилообразного напряжения до нуля, что хорошо подтверждает сделанные в первой главе выводы при качественном сравнении различных способов управления.

В второй главе рассматривается также физическая сторона причины неустойчивого фазового режима регулирования при релейном управлении и устойчивого - при вертикальном, которая, как показано в работе связана с формой пульсации выходного напряжения выпрямителя и углом наклона пилообразного напряжения.

ГЛАВА III

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТОКОВЫХ РЕЖИМАХ СИЛОВОЙ ЦЕТИ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

В этой главе рассматривается устойчивость фазового режи-

ма с учетом коммутации, а также в случае прерывистого токового режима. Необходимость учета этих явлений возникает в связи с тем, что они приводят к изменению формы пульсации выходного напряжения выпрямителя, а форма пульсации, как показано во второй главе, оказывает существенное влияние на устойчивость фазового режима.

Общий для рассматриваемых токовых режимов является то, что период работы выпрямителя разбивается как бы на два интервала (интервал перекрытия и рабочий – при учете коммутации, интервал протекания тока и бестоковый – при наличии прерывистых токов) в каждом из которых форма выходного напряжения выпрямителя определяется различной, соответствующей этому интервалу кривой.

В связи с этим, при составлении линеаризованной системы разностных уравнений, описывающих поведение замкнутой системы сначала составляются линеаризованные системы разностных уравнений описывающих поведение замкнутой системы на каждом из интервалов:

$$\Delta X(n+g) = A_{n+g} \Delta X(n), \quad (6)$$

$$\Delta X(n+1) = A_{g+1} \Delta X(n+g) + \tilde{A}_{n+1} \Delta X(n), \quad (7)$$

где $\Delta X(n)$, $\Delta X(n+1)$, $\Delta X(n+g)$,

- вектора переменных, характеризующих состояние замкнутой системы соответственно в моменты начала и конца одного периода работы выпрямителя и в момент разделяющий интервалы,
- матрицы коэффициентов (частных производных) устанавливающих связь между соответствующими переменными состояния.

A_{n+g} , A_{g+1} ,
 \tilde{A}_{n+1}

Система линеаризованных разностных уравнений описывающая поведение замкнутой системы в целом получается путем подстановки (6) в (7).

$$\Delta X(n+1) = A_{n+1} \Delta X(n), \quad (8)$$

где

$$A_{n+1} = A_{g+1} A_{n+3} + \tilde{A}_{n+1}$$

-матрица коэффициентов устанавливающая связь между переменными состояния в начале и конце периода работы выпрямителя.

Дальнейший анализ, как и в предыдущей главе, сводится к отысканию областей устойчивости, где собственные значения матрицы по модулю меньше единицы.

При исследовании устойчивости с учетом коммутации принимаются следующие допущения: выходное сопротивление силового трансформатора пренебрежимо мало, в контуре коммутации действует только индуктивное сопротивление, линейная часть замкнутой системы регулирования первого порядка, в схеме с вертикальным управлением все каналы симметричны.

Основные результаты, полученные в процессе исследования конкретных схем с учетом коммутации, можно сформулировать следующим образом:

1. Явление коммутации в замкнутых схемах с управляемым выпрямителем и линейной частью первого порядка приводит к смещению граничной кривой, в результате чего неустойчивые режимы фазового регулирования (при уменьшении угла наклона пилообразного напряжения) могут возникнуть во всем диапазоне регулирования.

2. В схеме с релейно-фазовым управлением и регулированием по мгновенному значению сигнала управления, при возрастании угла коммутации, излом в граничной кривой смещается из области максимальных инверторных режимов в область максимальных выпрямительных режимов.

3. С увеличением угла коммутации увеличивается амплитудное значение граничной кривой.

Исследование устойчивости установившегося режима в прерывистом токовом режиме выполнено для следующих условий: линейная часть замкнутой схемы первого порядка, противо ЭДС сило-

вой цепи в области малых отклонений угла регулирования считаются постоянной, в схеме с вертикальным управлением все каналы симметричны.

При этом получены следующие результаты:

1. С уменьшением интервала протекания тока наблюдается смещение по фазе граничных кривых, которое приводит к возможности появления неустойчивых режимов (при уменьшении угла наклона пилообразного напряжения до нуля) во всем диапазоне регулирования.

2. Амплитуда граничной кривой в большой степени зависит от характера нагрузки силовой цепи, при этом наибольшее значение она имеет в случае чисто активной и наименьшее - чисто индуктивной нагрузки.

ГЛАВА 1У

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАМКНУТЫХ СХЕМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

Глава посвящена исследованию качества переходных процессов в замкнутых схемах, устойчивость которых исследовалась во второй главе.

Предварительная оценка качества переходного процесса производится путем построения приближенных диаграмм переходного процесса на плоскости переменных состояния (аналогичной фазовой плоскости для непрерывных систем) методом предложенным в работе. Диаграммы переходного процесса на плоскости переменных состояния имеют дискретный характер и показывают отклонение переменных состояния от установившегося режима (начала координат) при изменении порядкового номера коммутации.

Приближенный метод построения диаграмм переходного процесса основывается на двух допущениях:

1. Кривая напряжения обратной связи, при наличии отклонения начальных условий от установившегося режима, перемещается параллельно в направлении оси ординат по отношению к кривой, соответствующей установившемуся режиму.

2. Напряжение обратной связи в окрестности точки установившегося режима до коммутации и после коммутации изменяется

по линейному закону. В связи с принятными допущениями производится качественная оценка допускаемой при построении ошибки.

Рассмотрение движения замкнутых схем на плоскости переменных состояния, при различных способах управления, позволяет получить полную качественную картину переходных процессов в замкнутых схемах с линейной частью первого порядка, помогает выяснить физическую сущность процесса регулирования.

Дальнейшая оценка характера переходного процесса производится путем исследования кривых распределения корней характеристического уравнения линеаризованной системы разностных уравнений при изменении угла наклона пилообразного напряжения.

Количественная оценка переходного процесса производится из следующих сображений.

В общем случае корни характеристического уравнения (5) могут быть кратными, действительными и комплексно-сопряженными. Решения разностного уравнения будут включать в себя при этом соответственно составляющие

$$(\lambda'')^k; \lambda''; \rho'' \cos \varphi_n + i \sin \varphi_n, \quad (9)$$

где λ, ρ, φ - соответственно: действительный корень характеристического уравнения, модуль и фаза комплексно-сопряженных корней,

k - кратность корней.

Составляющие $(\lambda'')^k$, когда $\lambda > 0$ и φ'' являются дискретными аналогами некоторых непрерывных экспонент, поэтому для параметров λ и ρ можно определить соответствующие им эквивалентные постоянные времени. В случае, когда $\lambda < 0$ можно также определить некоторую фиктивную эквивалентную постоянную времени для абсолютной величины корня λ .

С учетом сказанного эквивалентная постоянная времени определяется из выражения

$$\tau_s = \frac{T_1}{\ln |\lambda|} \quad (10)$$

Параметр φ характеризует частоту колебаний составляющей решения, определяемой комплексно-сопряженными корнями характеристического уравнения,

$$f = \frac{\varphi}{2\pi T_1}. \quad (11)$$

О быстродействии замкнутой системы можно судить по величине наибольшего модуля из всех корней характеристического уравнения или его эквивалентной постоянной времени, причем в последнем случае время переходного процесса (при известных допущениях) можно считать примерно равным $3T_2$, если $3T_2 > T_1$ или T_1 в противоположном случае.

Исследование характера распределения корней характеристического уравнения в конкретных схемах с различными способами управления (выполненное в работе) позволяет сделать следующие выводы:

1. Существует возможность выбора оптимального угла наклона пилообразного напряжения при котором длительность переходного процесса получается наименьшей. При этом в замкнутых схемах описываемых разностным уравнением первого порядка наименьшая длительность переходного процесса равна T_1 . В замкнутых схемах описываемых разностным уравнением второго порядка оптимальное значение угла наклона пилообразного напряжения соответствует нижней границе комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения, где минимальное время и максимальная частота переходного процесса.

2. Оптимальное значение угла наклона пилообразного напряжения изменяется с изменением угла регулирования. Исходя из этого, в работе рассматриваются методы настройки реальных схем из условия получения быстродействия близкого к максимальному в широком диапазоне углов регулирования.

3. В области излома граничных кривых, схем с релейно-фазовым управлением и регулированием по мгновенной величине сигнала управления, характер распределения корней характеристического уравнения указывает на существование в замкнутом контуре положительной обратной связи, которая является следствием, как показано при построении диаграмм переходного процесса,

изменения формы пульсации напряжения обратной связи.

В этой главе выполнено сравнение применяемого в работе метода исследования с помощью линеаризованных разностных уравнений с методами, основанными на замене управляемого выпрямителя: непрерывным эквивалентным генератором, эквивалентным генератором со звеном чистого запаздывания и импульсным фиксирующим звеном нулевого порядка, которое показывает, что при некоторых соотношениях параметров (когда амплитуда пилообразного сигнала становится соизмеримой с амплитудой пульсации сигнала обратной связи) перечисленные методы аппроксимации могут привести к качественно неправильным результатам.

В заключении главы приводятся осциллограммы переходных процессов, снятые в лабораторной выпрямительной установке, которые хорошо иллюстрируют возможность выбора оптимального значения угла наклона пилообразного напряжения.

ГЛАВА У

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ С РЕЛЕЙНО-ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В этой главе приведены результаты, которые были получены в процессе проектирования практических схем с релейно-фазовым управлением.

Специфической задачей возникающей при проектировании одноканальных схем, в отличие от многоканальных, является задача распределения импульсов, сформированных в единственном канале между вентилями. Сложность распределительного устройства во многом зависит от требуемого диапазона регулирования, а также от способа формирования импульсов.

В главе приводится описание способа формирования импульсов с помощью пик-трансформаторов имеющих специальную обмотку управления. В связи с указанным способом формирования, приводится описание принципов построения, а также ряда практических схем распределительных устройств.

Другой задачей возникающей при проектировании промышленных установок является разработка реверсивных схем. Реверсив-

ные управляемые выпрямители выполняются обычно путем встречно-параллельного включения двух нереверсивных. При этом различают несколько способов управления выпрямителями, наиболее экономичным из которых является способ раздельного управления.

Надежность работы устройства раздельного управления определяется алгоритмом его работы, который в свою очередь, как показано в этой главе, должен составляться с учетом возникающих при работе помех.

В заключении главы приводится краткое описание двух промышленных выпрямительных установок с релейно-фазовым управлением, а также сравнение по количеству элементов, реверсивной схемы с релейно-фазовым управлением и схем реверсивных преобразователей с вертикальным управлением серийно выпускаемых промышленностью. Сравнение показывает, что схема с релейно-фазовым управлением отличается существенно меньшим количеством элементов.

Результаты наладки и испытания лабораторного макета с релейно-фазовым управлением, а также опытно-промышленных выпрямительных установок, хорошо подтверждают полученные в работе теоретические результаты.

ВЫВОДЫ

1. Замкнутые схемы с управляемым выпрямителем (с точки зрения теории автоматического управления) представляют собой нелинейные импульсные системы, которые, как доказывается в работе, можно исследовать по линейному приближению нелинейных разностных уравнений описывавших замкнутую систему.

2. Релейное управление является предельным случаем к которому могут быть сведены схемы с вертикальным и релейно-фазовым управлением, когда амплитуда пилообразного напряжения в них стремится к нулю (коэффициент усиления соответственно к бесконечности).

3. Схемы с релейно-фазовым управлением и регулированием по усредненному за период сигналу управления по своим динамическим свойствам близки к схемам с вертикальным управлением.

4. В схемах с релейно-фазовым управлением и регулирова-

нием по мгновенному значению сигнала управления возможно возникновением (в некоторых режимах) положительной обратной связи, которая резко ухудшает динамические свойства замкнутых схем.

5. Явление коммутации, а также наличие прерывистого токового режима выпрямителя в замкнутых схемах управления с линейной частью первого порядка приводит к смещению граничной кривой, в результате чего неустойчивые режимы фазового регулирования (при уменьшении угла наклона пилообразного напряжения) могут иметь место во всем диапазоне регулирования.

6. Для качественной оценки характера переходного процесса, а также лучшего уяснения физической сущности процесса регулирования в работе предложен метод исследования замкнутых схем на плоскости переменных состояния (аналогичной фазовой плоскости непрерывных систем) путем построения приближенных диаграмм переходного процесса.

7. Показана возможность настройки коэффициента усиления замкнутой системы из условия обеспечения максимального быстродействия.

8. Выполнено сравнение: метода исследования с помощью линеаризованных разностных уравнений и методов основанных на замене управляемого выпрямителя непрерывным эквивалентным генератором, эквивалентным генератором со звеном чистого запаздывания, а также импульсным фиксирующим звеном нулевого порядка, которое показывает, что перечисленные виды аппроксимации управляемого выпрямителя при некоторых соотношениях параметров могут привести к качественно неправильным результатам.

9. Разработаны и введены в опытно-промышленную эксплуатацию выпрямительные установки с релейно-фазовым управлением, которые отличаются существенной простотой от аналогичных с вертикальным управлением, серийно выпускаемых промышленностью.

10. Основные теоретические результаты полученные в работе хорошо согласуются с результатами, полученными в процессе наладки и испытаний опытно-промышленных установок, а также лабораторного макета.

Результаты работы были доложены и обсуждены:

1. На семинаре "Исторические системы электропривода и про-

мышленной автоматики постоянного тока". ЛДНТП, г. Ленинград, 1970.

2. На итоговых научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола в 1969, 1970, 1971, 1972 г.г.

3. На Всесоюзном семинаре "Внедрение в машиностроении новых приборов и средств автоматизации производственных процессов". КДНТП, Киев, 1969.

4. На семинаре "Автоматизация и управление производственными процессами на предприятиях машиностроения и приборостроения". КДНТП, Киев, 1970.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Пинчук И.С., Ильин В.И., Гладышев С.П. Анализ устойчивости фазового режима в тиристорных преобразователях с релейно-фазовым управлением. Приборы и устройства автоматического регулирования. Сб.н.т. № 88, ч. 1, ЧПИ, Челябинск, 1971.

2. Пинчук И.С., Ильин В.И., Гладышев С.П., Каретный О.Я. О раздельном управлении мостовым тиристорным преобразователем, работающим на двигатель постоянного тока. "Электротехника", № 10, 1970.

3. Пинчук И.С., Ильин В.И., Гладышев С.П. Устройство для раздельного управления реверсивным вентильным преобразователем. Авт. свид. № 289492, приоритет от 22 апреля 1968 г. БИ № 1, 1971.

4. Пинчук И.С., Ильин В.И., Гладышев С.П. Устройство управления мостовым вентильным преобразователем. Авт. свид. № 285091, приоритет от 2 июля 1968 г. БИ № 33, 1971.

5. Ильин В.И., Гладышев С.П., Каретный О.Я., Доронин В.П. Применение релейно-фазового регулирования для трехфазного тиристорного моста. Приборы и устройства автоматического регулирования. ч. 1, сб.н.т. № 88, ЧПИ, Челябинск, 1971.

6. Ильин В.И., Гладышев С.П., Каретный О.Я., Доронин В.П., Осипов Ю.В. Формирование и распределение управляющих импульсов в релейно-фазовой системе управления тиристорным преобразователем. Приборы и устройства автоматического управления. Сб.н.т.

№ 88, к. 1, ЧПИ, Челябинск, 1971.

7. Ильин В.И., Гладышев С.П., Мардер А.Х., Каретный О.Я. Релейно-фазовое управление тиристорным преобразователем с искусственной коммутацией. Сб.н.т. ЭП серия "Преобразовательная техника", вып. 20, 1971.

8. Ильин В.И., Гладышев С.П., Доронин В.П. Датчик проводящего состояния тиристорного моста в системе раздельного управления. Сб.н.т. ЭП серия "Преобразовательная техника", вып. 1(25), 1972.

9. Ильин В.И., Пинчук И.С., Гладышев С.П., Доронин В.П., Каретный О.Я. Тиристорный преобразователь с релейно-фазовым управлением. Тиристорные системы электропривода и промышленной автоматики постоянного тока. ч. П. Материалы к семинару 19-22 мая, ЛДНТИ, Л., 1970.

10. Ильин В.И., Гладышев С.П., Каретный О.Я., Доронин В.П. Схема реверсивного тиристорного преобразователя на 200 квт. Автоматизация и управление производственными процессами на предприятиях машиностроения и приборостроения. Материалы семинара. КДНТИ, Киев, 1970.

11. Пинчук И.С., Ильин В.И., Гладышев С.П., Каретный О.Я. Реверсивный тиристорный преобразователь с релейно-фазовым управлением. Информационный листок № 21(3551) ЮУЦНТИ, Челябинск, 1969.

12. Пинчук И.С., Ильин В.И., Гладышев С.П., Каретный О.Я. Схема раздельного управления реверсивным мостовым тиристорным преобразователем. Информационный листок № 197(3723) ЮУЦНТИ, 1969.

13. Пинчук И.С., Ильин В.И., Гладышев С.П., Каретный О.Я. Схема поочередной коммутации анодной и катодной группы мостового тиристорного преобразователя. Информационный листок № 376(3846) ЮУЦНТИ, 1969.